

# PLAN DE SEGUIMIENTO AMBIENTAL SALAR DE ATACAMA

---



## Medición de superficies de cuerpos Lacustres Campaña Abril 2011



Santiago, Junio de 2011  
SQM-INF-146-REV-0



## CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>3</b>
3.1	ANÁLISIS DE IMAGENES SATELITALES .....	4
3.2	DIGITALIZACIÓN DE CONTORNOS .....	7
3.3	CONTROL DE TERRENO .....	8
3.4	DELIMITACIÓN DE SUPERFICIES LACUSTRES .....	9
3.5	ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS .....	10
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>12</b>
4.1	SISTEMA SONCOR .....	12
4.2	SISTEMA PEINE.....	19
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>28</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

El presente informe tiene por objeto exponer el trabajo realizado para la medición de superficies de los cuerpos lacustres del Borde Este del Salar de Atacama, que se realiza anualmente como parte de las actividades del Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) del EIA "Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama", aprobado ambientalmente por la Resolución exenta N°226/2006 de la Comisión Regional del Medio Ambiente Región de Antofagasta.

Conforme a lo indicado en dicha resolución N°226/2006, el PSA considera efectuar una medición anual de la superficie lacustre de las principales lagunas de los sistemas Soncor (Puilar, Chaxa y Barros Negros) y Peine (Salada, Saladita e Interna), mediante análisis de imágenes satelitales de alta resolución y levantamiento topográfico.

Posteriormente, la Resolución exenta N°244/2010 de la COREMA Región de Antofagasta, modifica la frecuencia de la medición topográfica, fijándola en 5 años, y acoge la nueva propuesta metodológica para la medición de las superficies lacustres mediante imágenes satelitales en forma anual, la cual incorpora el uso de la imagen satelital con mejoras en su procesamiento, el uso de diversos índices espectrales para la delimitación de contornos y el uso de puntos de terreno como control y corrección de límites. El presente informe fue elaborado conforme a la metodología aceptada en la Resolución exenta N° 224/2010.

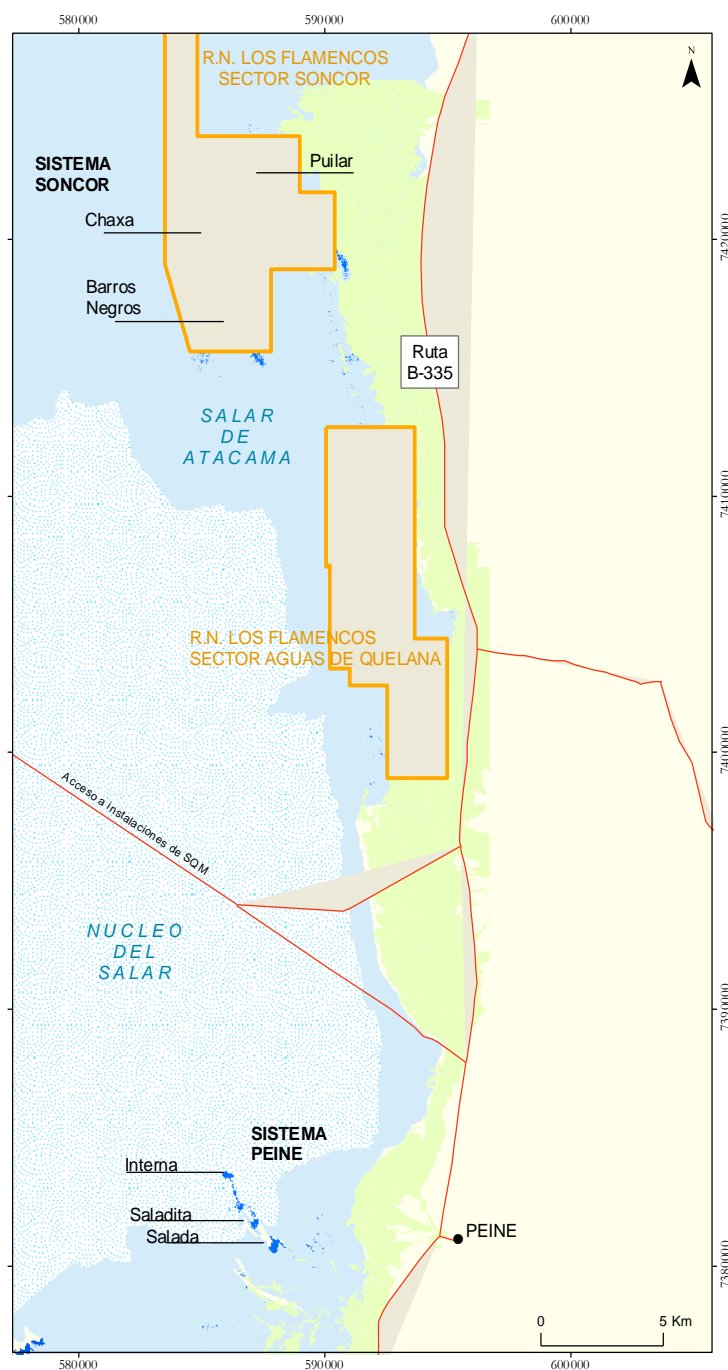
## 2 ÁREA DE ESTUDIO

Se estudió un total de seis (6) lagunas ubicadas en el Borde Este del Salar de Atacama, pertenecientes a dos sistemas lacustres: Soncor y Peine (Figura 3.1).

Las lagunas del sistema Soncor forman parte de la Reserva Nacional Los Flamencos, y está conformado por las lagunas Barros Negros, Chaxa y Puilar, además del Canal Burro Muerto. La laguna de mayor tamaño de este sistema es Barros Negros. La laguna de Barros Negros se conecta hacia el norte con la laguna Chaxa mediante el Canal Burro Muerto. La laguna Puilar se ubica al noreste de las lagunas mencionadas anteriormente y constituye la más pequeña del sistema, no obstante, existe un gran número de cuerpos de agua pequeños y someros que acompañan a estas lagunas.

El sistema lacustre Peine está formado por tres (3) lagunas conectadas entre sí por un canal. La más septentrional del sistema es la laguna Interna. Ésta está conformada por pequeños cuerpos de agua sin poseer uno principal. Hacia el sur de esta laguna se encuentra la laguna Saladita. En la misma dirección y conectada con Saladita a través de un canal se ubica la laguna Salada.

**FIGURA 3.1**  
**LAGUNAS DE LOS SISTEMAS SONCOR Y PEINE**

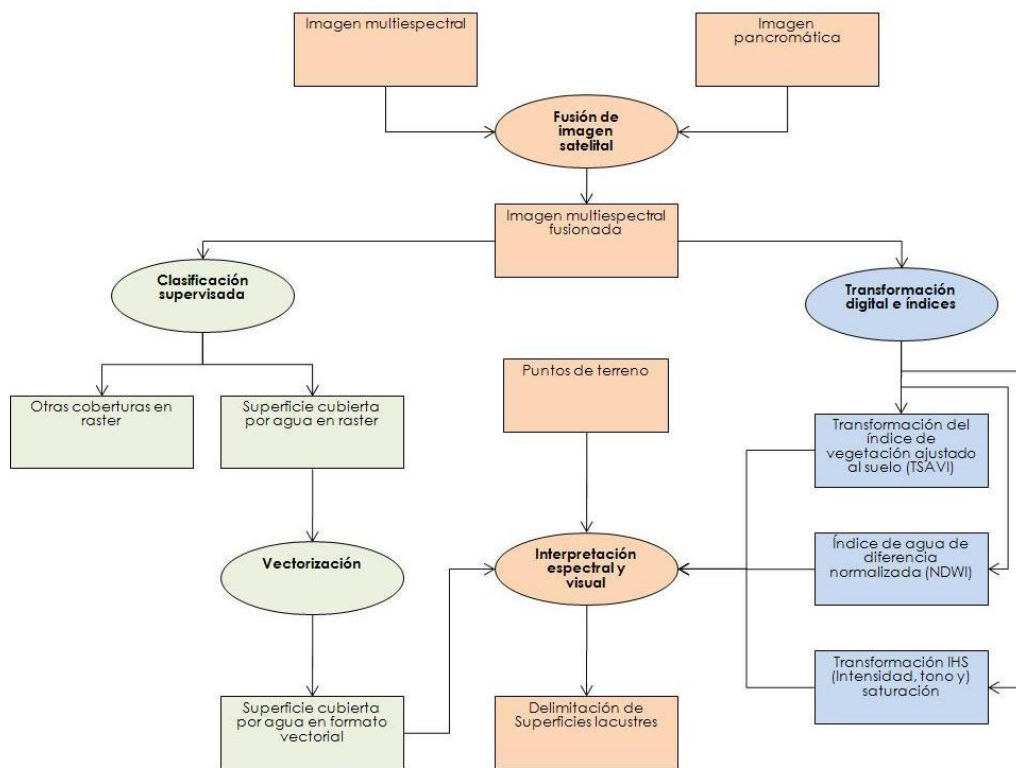


### 3 METODOLOGÍA

La medición de las superficies lacustres se realizó según la metodología establecida en la RCA 244/2010. En ella se señala la utilización de imágenes de alta resolución, aplicándose índices y transformaciones espectrales, posterior a la fusión de la imagen pancromática y la multiespectral. En forma paralela, se realizó un control de terreno en aquellos puntos definidos en la campaña de terreno 2010. En cada uno de ellos se describió las propiedades fisonómicas de las lagunas y se realizó un respaldo mediante registro fotográfico.

La metodología descrita en la RCA 244/2010 señala una serie de diferencias al método utilizado en las la determinación de superficies lacustres los años 2008 y 2009 (RCA 226/2006). En la Figura 4.1 se muestra un diagrama general respecto a la metodología empleada en el cálculo de superficie lacustre.

**FIGURA 4.1**  
**ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA EN EL CÁLCULO DE SUPERFICIE DE SISTEMAS LACUSTRES**



A continuación se detallan las etapas de la metodología.

### 3.1 ANÁLISIS DE IMAGENES SATELITALES

La primera etapa contempló la obtención de la imagen satelital de alta resolución para el área de interés, la cual corresponde a una imagen del satélite WorldView-II en modalidad Bundle. Ésta incluye una imagen pancromática de 1 banda con una resolución espacial de 0,5 metros y una imagen multiespectral de 4 bandas con una resolución espacial de 2 metros. La imagen satelital fue capturada por el satélite el 9 abril de 2011.

A continuación se detallan los principales pasos del procesamiento de la imagen satelital para la obtención de la superficie lacustre:

#### a) Georreferenciación de la imagen satelital

Para posicionar geográficamente la imagen satelital se utilizó un sistema de coordenadas UTM 19 Sur y Datum WGS 84. Este es un Datum global, utilizado como sistema nativo en GPS y en gran parte de las imágenes satelitales existentes en el mercado. El uso de la imagen satelital en este sistema de georreferenciación permite obtener una mayor precisión y mayor compatibilidad con los datos obtenidos mediante GPS, que si se utilizara la imagen en otro sistema. Esto debido a que al utilizar otro sistema de referencia geográfica es necesario realizar transformaciones que implica un aumento en la fuente error o de reducción de la precisión geográfica.

#### b) Fusión de Imágenes

Con el fin mejorar la resolución espacial, de modo de obtener un mayor detalle en la imagen multiespectral, ésta se combinó con la imagen pancromática mediante el método modificado de fusión de imágenes satelitales IHS<sup>1</sup> (Siddiqui, 2003), con lo cual la imagen multiespectral alcanza la resolución espacial de la imagen pancromática (0,5 m).

Esta técnica corresponde a una modificación del tradicional método de fusión IHS, que consiste en una transformación de los colores elementales RGB (rojo, verde y azul, en sus siglas en inglés) al sistema IHS (Intensidad, tono y saturación en sus siglas en inglés). Posteriormente se realiza una transformación inversa (IHS a RGB), reemplazando la componente intensidad por la imagen pancromática, dado que ambos se relacionan con las variables espaciales del albedo, presentando una buena correlación (Chuvieco, 2002).

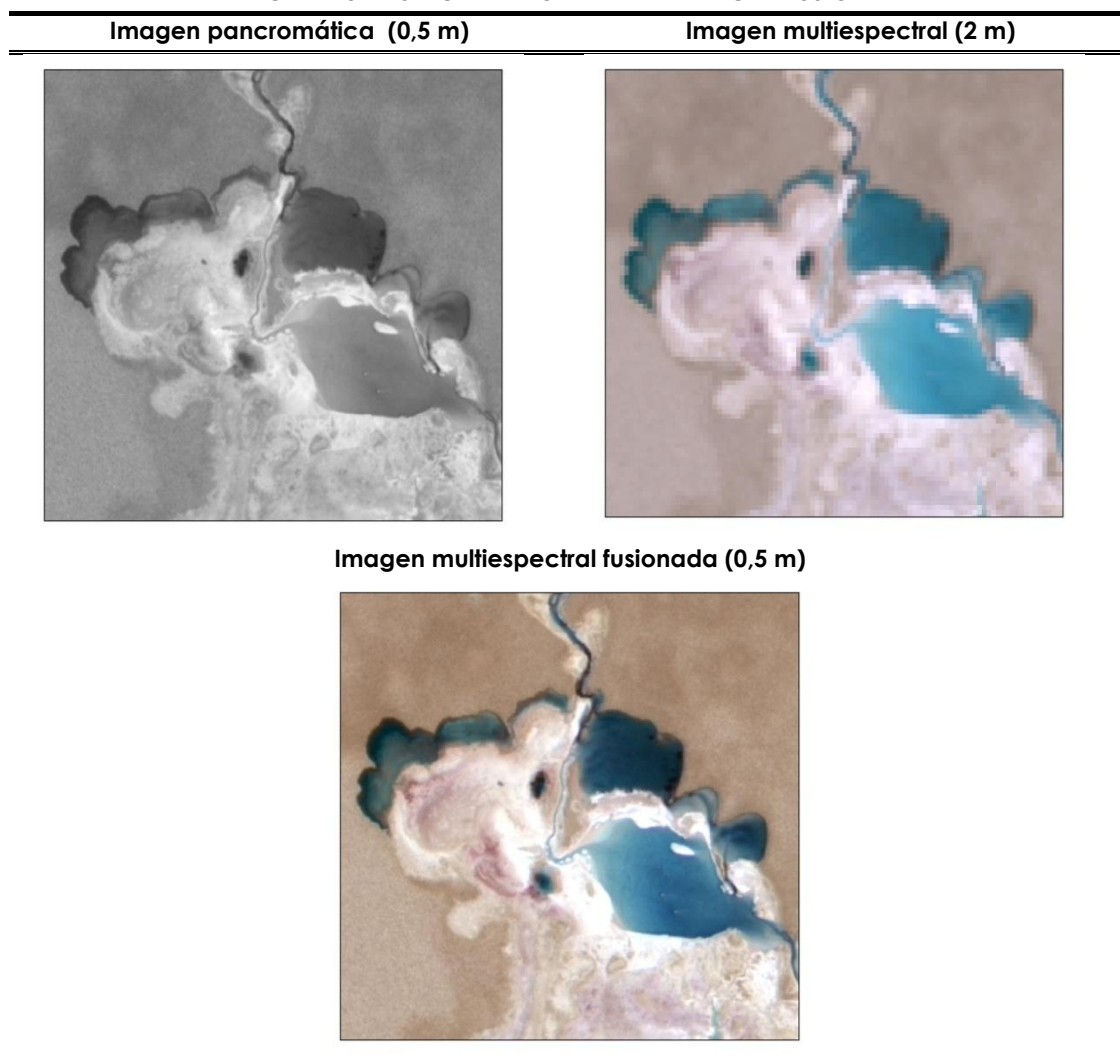
Dado que la imagen pancromática no siempre se correlaciona de buena forma con la componente intensidad, se incluye una serie de modificaciones al modelo, debido a que la imagen fusionada con el tradicional método no se asemeja a la original (Siddiqui, 2003). Para corregir este problema se superpone espectralmente cada banda multiespectral con la imagen pancromática, modificando la intensidad de esta última a partir de una

<sup>1</sup> Método IHS modificado para fundir imágenes de satélite.

ponderación, la cual se realiza en base a las longitudes de onda sobre cada banda (Siddiqui, 2003).

**FIGURA 4.2**

**IMAGEN MULTIESPECTRAL WORLDVIEW E IMAGEN FUSIONADA**



c) Transformaciones multispectrales.

Con el fin de apoyar la fase de corrección y la delimitación de las superficies lacustres se realizaron las siguientes transformaciones digitales: Índice de agua de diferencia normalizada (MNDWI), la transformación del índice de vegetación ajustado al suelo (TSAVI) y la transformación IHS, los que se presentan en detalle a continuación (Figura 4.3):

- Modificación del índice de agua de diferencia normalizada (MNDWI)

El índice MNDWI corresponde a un índice para la discriminación de aguas abiertas, cuya elaboración fue realizada para sensores de mayor resolución espectral, especialmente para sensores que capturan información entre 0,76-0,9 micras (infrarrojo cercano) y las 1,55-1,75 micras (infrarrojo medio). Dada la ausencia del infrarrojo medio en la mayoría de los sensores de mayor resolución espacial como Worldview-2, McFeeters (1996) realizó una modificación a este índice, calculándose a través de una diferencia normalizada entre la banda verde ( $ND_v$ ) y el infrarrojo cercano ( $ND_{irc}$ ), considerando la respuesta espectral del agua en dichas bandas, como se observa en la ecuación:

$$MNDWI = \frac{ND_v - ND_{irc}}{ND_v + ND_{irc}}$$

- Transformación del índice de vegetación ajustado al suelo (TSAVI)

Éste pertenece a una familia de curvas que modifican el índice de vegetación NDVI, cuyo inconveniente principal es su sensibilidad a las propiedades ópticas del suelo. Las modificaciones del TSAVI se contextualizan en la introducción de parámetros radiométricos del suelo (Factores  $a$  y  $b$  en la ecuación), minimizando la sensibilidad a estos efectos (Gilabert *et al*, 1997), como se puede observar en la siguiente ecuación:

$$TSAVI = \frac{a \cdot ND_{irc} - a \cdot ND_r - b}{ND_r + a \cdot ND_{irc} - ab + 0,08 \cdot 1 + a^2}$$

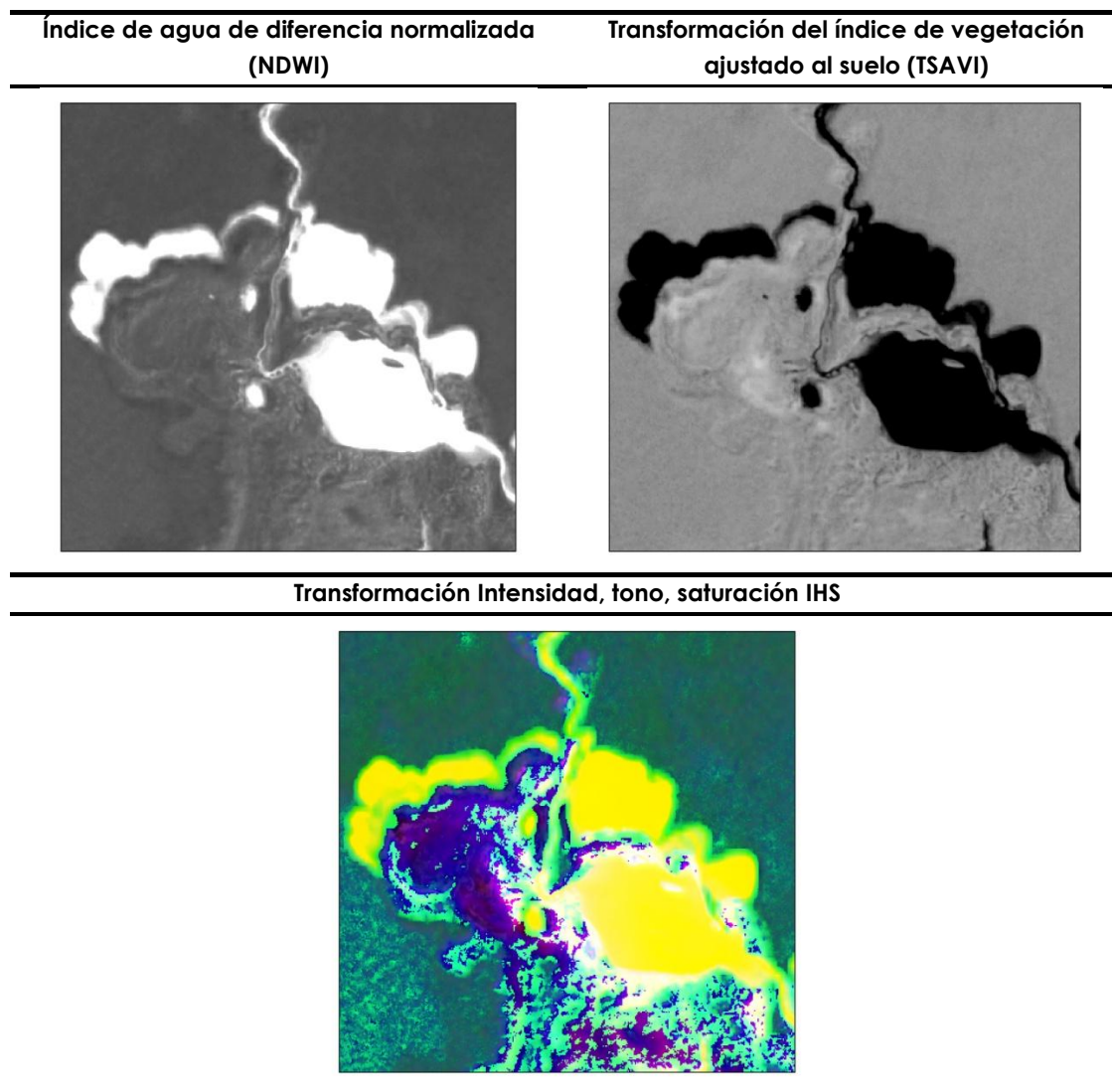
Debido a los antecedentes planteados, para este monitoreo no se utilizó como herramienta de apoyo el NDVI (Índice de diferencia normalizada de vegetación)

- Transformación IHS

Como se mencionó en el método de fusión, básicamente transforma los valores de una composición de RGB (Bandas verde, roja e infrarroja para el caso de este estudio) en una forma alternativa de representar el color basado en sus propiedades. Se trata de la transformación intensidad, tono y saturación (IHS; del inglés intensity, hue and saturation). Su uso para la discriminación de agua, se basa en su potencialidad para la discriminación de algunos rasgos de carácter cromático (Chuvieco, 2002).



**FIGURA 4.3**  
**TRANSFORMACIONES DIGITALES DE LA IMAGEN SATELITAL**



### 3.2 DIGITALIZACIÓN DE CONTORNOS

La identificación de coberturas se realizó mediante clasificación supervisada de imágenes satelitales fusionadas. Dada la resolución espacial y espectral de estas imágenes es posible realizar clasificaciones detalladas y de forma efectiva.

La clasificación supervisada implica una serie de procedimientos diseñados para categorizar automáticamente todos los píxeles de una imagen en distintas clases de cobertura de suelo. En términos generales, estos procesos corresponden a la creación de áreas de entrenamiento y la clasificación propiamente tal.

La creación de áreas de entrenamientos con el fin de identificar superficies lacustres consistió en la identificación y selección de píxeles representativas tanto para las lagunas como para las coberturas presentes en la superficie perimetral de cada laguna. Para aquello se requirió la identificación de patrones de cobertura en la imagen a través de un software de análisis de imágenes.

La segunda etapa corresponde a la clasificación propiamente tal utilizando el método de máxima similitud, con el cual, los píxeles de la imagen fueron clasificados de acuerdo a las categorías asignadas a los Niveles digitales (ND) de las zonas de muestreo. Esto se realizó mediante iteraciones a fin de ajustar estadísticamente los valores digitales al interior de cada categoría. Una vez calculada la desviación típica y la matriz de covarianza, se realizó un proceso de frontera espectral mediante un clasificador de mínima distancia. Este paso consiste en asignar el píxel a la clase más cercana. Una vez efectuado este proceso, se analizó y clasificó cada una de las categorías identificadas, las que fueron agrupadas en cuerpos de aguas y otras coberturas.

Producto del análisis de la imagen satelital se obtuvo información digital en formato raster (píxeles de resolución 0,5x0,5 m) de superficies cubierta con agua y de otras coberturas.

Para efectos de revisión y posterior delimitación, se seleccionaron las coberturas correspondientes a cuerpos de agua. Éstas, fueron sometidas a un proceso de vectorización de sus contornos, identificando finalmente aquellos cuerpos lacustres de los sistemas.

### 3.3 CONTROL DE TERRENO

En forma concomitante a la toma de la imagen satelital se efectuó una campaña de terreno entre los días 22 y 25 de abril de 2011, con el propósito de demarcar y obtener información necesaria para la caracterización de las superficies lacustres. Los sectores prospectados son aquellos de difícil delimitación tanto en terreno como en la imagen satelital, dado que son zonas cuyos límites son difusos.

Es así como se visitó cada una de las lagunas, excepto laguna Interna del Sistema Lacustre Peine. La exclusión de esta laguna se debe a su compleja estructura, la cual se encuentra constituida por un conjunto de cientos de cuerpos de agua someros que dificultan la identificación de sus bordes en terreno, delimitándose únicamente a través del análisis de la imagen.

La demarcación en terreno se realizó mediante un GPS cartográfico Trimble® Nomad® 900G especial para aplicaciones SIG con el fin de identificar los píxeles correspondientes en la imagen.

Los puntos evaluados en terreno correspondieron a aquellos definidos en la campaña de terreno 2010, de manera que se mantuvo el número y la ubicación aproximada. No obstante, dada la dinámica superficial de algunas lagunas fue necesario desplazar algunos puntos y agregar otros, especialmente en superficies de aguas someras y/o difusas que pudiesen presentar alguna dificultad en la delimitación con la imagen satelital.

El total de descripciones en terreno de los puntos de control de esta campaña se pueden apreciar en la Tabla 4.1, mientras que su localización en las figuras 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 5.10 y 5.11.

**TABLA 4.1**  
**NÚMERO DE PUNTOS DE TERRENO POR LAGUNA**

<b>SISTEMA LACUSTRE</b>	<b>LAGUNA</b>	<b>Nº DE PUNTOS DE TERRENO SEGÚN RESOLUCIÓN 244/2010</b>	<b>Nº DE PUNTOS ADICIONALES</b>	<b>TOTAL</b>
Soncor	Barros Negros	22	7	29
	Chaxa	9	-	9
	Puilar	16	1	17
Peine	Salada	4	-	4
	Saladita	16	1	17
	Interna	-	-	-
<b>Total</b>		<b>66</b>	<b>9</b>	<b>75</b>

En terreno se describieron las propiedades fisonómicas de las lagunas, considerando las características sedimentarias y de borde, más el espesor de la película de agua. Adicionalmente, se realizó un registro fotográfico de cada punto de control, respaldando la identificación de agua libre y suelo.

### 3.4 DELIMITACIÓN DE SUPERFICIES LACUSTRES

Una vez realizado el control de terreno, en un sistema de información geográfico (SIG) se procedió a la revisión y delimitación de los contornos de las lagunas.

Los procedimientos de delimitación se efectuaron mediante una superposición digital, que incluyó los contornos provenientes de la clasificación supervisada, puntos de control de terreno y las transformaciones espectrales extraídas de la imagen multispectral fusionada. A través de éstas se verificó el calce uno a uno mediante identificación visual y rectificándose vectorialmente el contorno de las superficies lacustres en los casos que fuese necesario.

Para efectos del monitoreo de las superficies, la delimitación consideró aspectos que faciliten la evaluación de los cuerpos de aguas, las que se señalan a continuación:

- a) Definición de límites de cada laguna según criterio CONAF.

Para efectos de evaluar variaciones superficiales en el tiempo, se estableció como límite aquellos sectores definidos históricamente por la Corporación Nacional Forestal (CONAF), expuestos en los informes monitoreo efectuados en el marco del convenio SQM-CONAF "Hábitat y Poblaciones de Avifauna del Salar de Atacama"<sup>2</sup>. Cabe señalar, que para laguna Interna que no presenta límite CONAF se utilizó el límite señalado en el Monitoreo 2010.

<sup>2</sup> Informe Hábitat y Poblaciones de Avifauna en el Salar de Atacama. CONAF - SQM Salar S.A. 2005.

b) Identificación áreas de inundación.

El análisis incorporó la identificación de áreas de inundación, con el fin de reconocer sectores que potencialmente podrían sufrir modificaciones perimetrales en el tiempo. La categorización requirió analizar los monitoreos anteriores y antecedentes hidrológicos.

En teoría las áreas de inundación corresponden a sectores de lagunas que, debido a su dinámica histórica, potencialmente presenten una variación sostenida y significativa en su contorno. Para tales efectos no se consideró sectores cuyos cambios efímeros (probables dinámicas diarias de la laguna) impliquen cambios marginales en los contornos de las lagunas.

### 3.5 ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS

La metodología señalada en este estudio plantea una serie de diferencias técnicas con respecto al método utilizado en las campañas 2008 y 2009 (RCA 226/2006).

La clasificación supervisada de la imagen satelital, ha sido la metodología empleada en la determinación de superficies lacustres desde la campaña 2008. Sin embargo este método se aplicó en imágenes satelitales con una resolución espacial menor en los años 2008 y 2009 (Imagen satelital multiespectral de 2,4 metros de resolución espacial), que la de las imágenes utilizadas en los años 2010 y 2011 (imágenes satelitales fusionadas, con una resolución espacial de 0,5 metros).

Para el apoyo en la delimitación, se agrega como transformación analítica el índice TSAVI y el NDWI en el método señalado en la RCA 244/2010. Este último es de gran importancia por cuanto está diseñado para la discriminación de cuerpo de agua en forma efectiva.

En ambos casos se utilizó como definición de límites los sectores asignados por CONAF. No obstante, para la campaña 2010 se establecieron algunos límites extras dada la condiciones hidrogeológicas de algunas lagunas. Esto implica, agregar nuevos sectores que anteriormente no habían sido considerados como parte de la laguna, como es el caso de Barros negros, y restringir algunos sectores como en el caso de Puilar.

En la campaña 2010, también se diferenció del cuerpo principal las áreas probables de inundación y otros sectores, mientras que en las campañas anteriores al 2010, no se diferenciaban sectores.

Los puntos de terreno para las campañas 2009 se utilizaron como factor para la validación de las delimitaciones producidas por la imagen satelital. Mientras que para las campañas posteriores, los puntos de terrenos permiten la corrección y revisión de la delimitación de las superficies lacustres.

En la tabla 4.2 se expone en forma sintética las diferencias metodológicas con las que se ha determinado las superficies de las lagunas a partir del año 2008.

**TABLA 4.2**  
**ANÁLISIS COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS**

	<b>Método Campaña 2008-2009</b>	<b>Método Campaña 2010-2011 (RCA 244/2010)</b>
<b>Método de digitalización de contornos</b>	Clasificación supervisada	Clasificación supervisada
<b>Imagen base</b>	Imagen multiespectral de 2,4 m	Imagen multiespectral fusionada de 0,5 m.
<b>Transformaciones analíticas de la imagen satelital</b>	IHS y NDVI	IHS, NDWI y TSAVI
<b>Uso de límites</b>	Definición de límites según criterios CONAF	Definición de límites según criterios CONAF + límites extras
<b>Objetivo de puntos de control</b>	Validación de la delimitación de las superficies lacustres	Corrección y revisión para la delimitación de las superficies

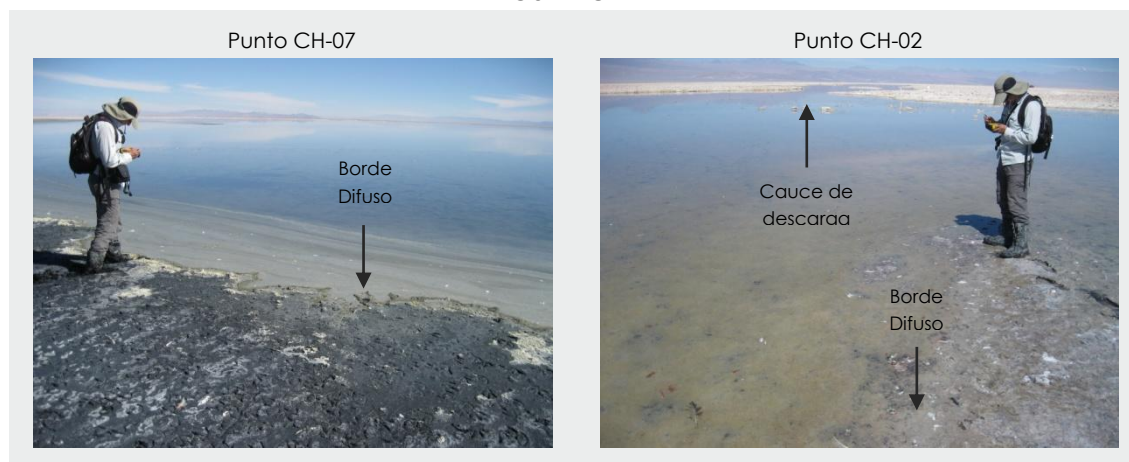
## 4 RESULTADOS

### 4.1 Sistema Soncor

#### 4.1.1 Laguna Chaxa

Laguna Chaxa se encuentra constituida por un cuerpo principal cuyo contorno mayoritariamente se encuentra bien definido, a partir de una costra salina blanquecina. No obstante, en casi todo el segmento Este (Figura 5.1. Cuadro CH-07) y en el sector Sur inmediatamente al oeste del cauce de descarga, se presenta un contorno difuso y de compleja delimitación producto de un sedimento barroso oscuro que se encuentra anegado de agua (Figura 5.1. Cuadro CH-02). Dicho contorno en algunos sectores presentan una lámina de agua milimétrica y en otras simplemente corresponde a suelo saturado.

**FIGURA 5.1**  
**FOTOGRAFÍAS DE PUNTOS DE CONTROL DE TERRENO**  
**LAGUNA CHAXA**



La Laguna Chaxa en esta campaña presentó una superficie de 305.433 m<sup>2</sup>, disminuyendo escasamente (1,0%) con respecto a la medición del año anterior (308.357 m<sup>2</sup>). Dichas diferencias se concentran en sectores difusos del Sector Este de la Laguna (Figura 5.1 CH-07).

Si se compara la medición actual con las mediciones 2008 y 2009 se observa una disminución del 7,8% y 10,2% respectivamente.

En el análisis espacio temporal de Chaxa, se observa una disminución de la superficie de la laguna. Sin embargo, esta disminución no presenta una tendencia clara y no necesariamente se debe a la disminución de la superficie de la laguna, sino que a una posible sobreestimación de las superficies en los periodos 2008-2009, debido a las diferencias metodológicas expuestas en el acápite 4.5, particularmente a que los puntos de control de terreno fueron utilizados sólo para estimar el error de asignación y no para la modificación de los contornos de la laguna.



FIGURA 5.2  
LAGUNA CHAXA

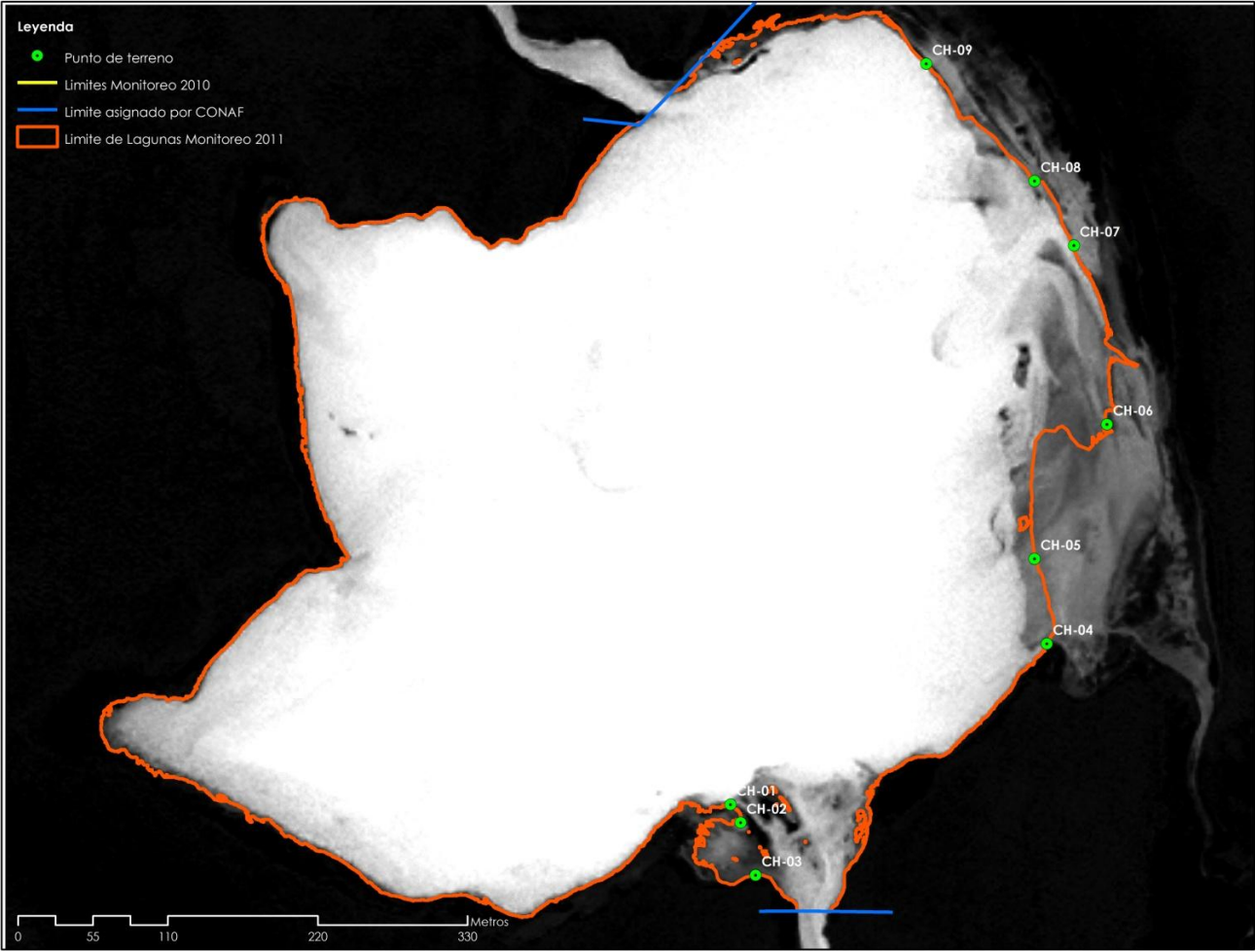


Imagen multiespectral

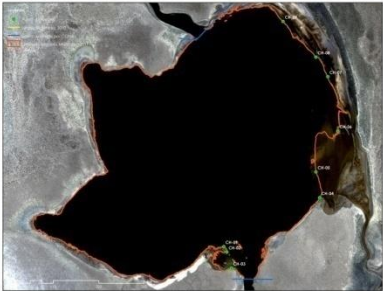


Imagen TSAVI

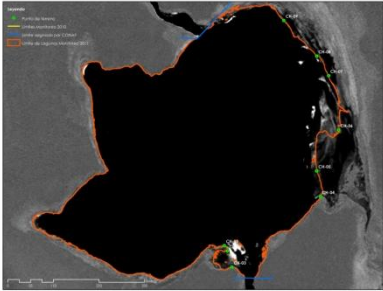
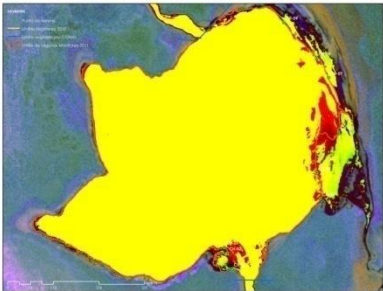


Imagen IHS



#### 4.1.2 Laguna Barros Negros

Barros Negros está constituida de un cuerpo principal y tres (3) áreas de inundación. El cuerpo principal presenta contornos mayoritariamente bien definidos. No obstante, también presenta sectores muy irregulares, especialmente en el sector Sur y Noreste donde se observan cuerpos de agua menores que se conectan al cuerpo principal. Estos cuerpos afloran entre el sedimento con una lámina de agua superficial, que en la mayoría de los casos posee profundidades milimétricas (Ver figura, 5.3, Punto BN-15).

La primera de las áreas de inundación (área de inundación I) asignada como “Cola de pez” se ubica en el sector Suroeste de la laguna. Su contorno es definido en gran parte del perímetro, con excepción de determinados sectores de compleja delimitación (Figura 4.3, Punto BN-22). Dicha zona se comenzó a evaluar como parte de la laguna desde el monitoreo 2010, dado que en anteriores monitoreos correspondía a un límite asignado por CONAF.

La segunda área de inundación (área de inundación II) se ubica en el segmento Este de la laguna. Presenta una configuración muy compleja, observándose afloramientos de agua que se conectan entre sí, cubriendo en ocasiones tan solo unos milímetros de agua (Figura 5.3, Punto BN-07).

La más pequeña de las áreas de inundación (área de inundación III) se ubica en el sector Sur. Corresponde a un cuerpo menor de agua de baja profundidad, el cual se conecta al cuerpo principal entre múltiples afloramientos sedimentarios (Figura 5.3, BN-14).

**FIGURA 5.3**  
**FOTOGRAFIAS DE PUNTOS DE CONTROL DE TERRENO**  
**LAGUNA BARROS NEGROS**





**FIGURA 5.3**  
**FOTOGRAFÍAS DE PUNTOS DE CONTROL DE TERRENO**  
**LAGUNA BARROS NEGROS**



La superficie que presenta Barros Negros en esta campaña de monitoreo es 1.325.448 m<sup>2</sup>. En el desglose por sectores, el cuerpo principal corresponde al 81,7% de la laguna (1.083.311 m<sup>2</sup>). El área de inundación más grande corresponde a la Área de inundación I - Cola de Pez (152.349 m<sup>2</sup>) correspondiente al 11,5%. Le sigue el área de inundación II, correspondiente a un 4,0% (53.035 m<sup>2</sup>) y la más pequeña, el áreas de inundación III correspondiente al 2,8% (36.753 m<sup>2</sup>) de la laguna.

Para este año se observó un aumento del 9,2% en la superficie con respecto a la medición anterior (2010). Este aumento se debe principalmente a la extensión de todas las áreas de inundación, especialmente la zona "Cola de Pez". También se observó la aparición de pequeños apéndices del cuerpo principal aunque participando en menor medida.

Si se comparan con las superficies de los monitoreos 2008 y 2009 se observa un aumento del 17,5%, y 13,0%, respectivamente. Tal como se señaló en la metodología en la sección 4.5, estas diferencias se deben a la incorporación de nuevos sectores (áreas de inundación). También se debe a que efectivamente se observó que Barros Negros en esta campaña aumentó su superficie.

FIGURA 5.4  
LAGUNA BARROS NEGROS

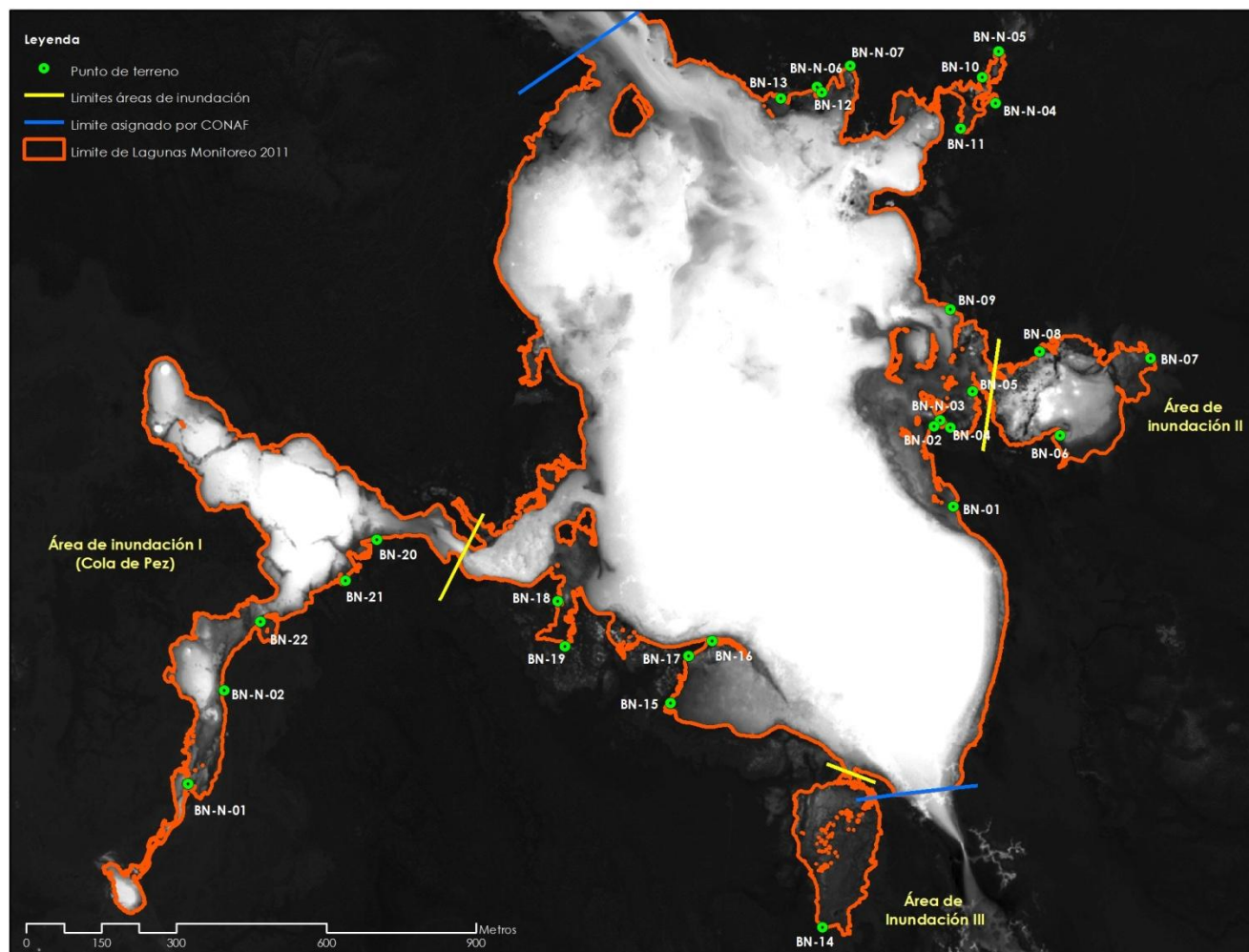


Imagen multispectral



Imagen TSAVI

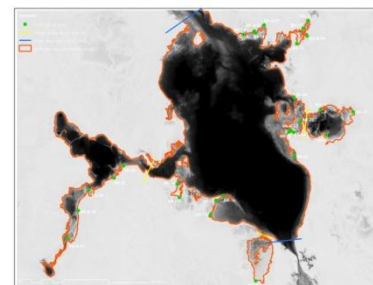
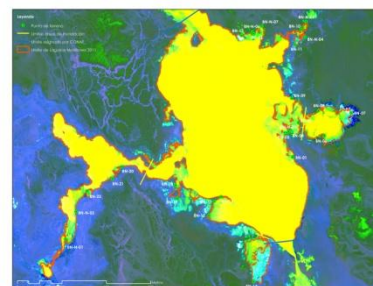


Imagen IHS



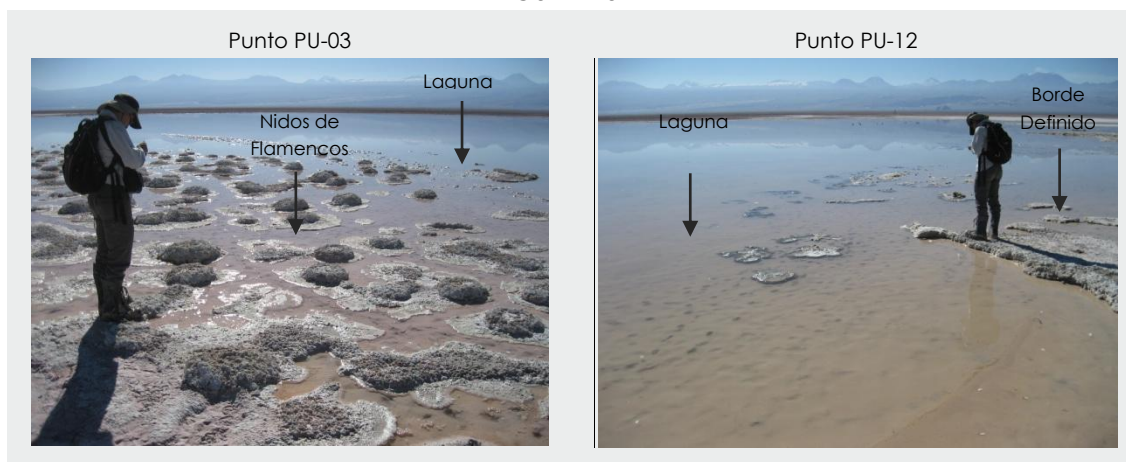
#### 4.1.3 Laguna Puilar

La laguna Puilar está constituida por un cuerpo principal sin presentar áreas de inundación. Los bordes de la laguna se observan bien definidos en el segmento Este, mientras que en los segmentos Norte, Oeste y Sur se presentan bordes muy difusos, constituidos principalmente por un barro muy húmedo y afloramientos rocosos, correspondiente a nidos de flamencos utilizados en los periodos de nidificación (Ver figura 5.5, punto PU-03).

En el límite Sur se observa un canal de descarga con flujo Norte-Sur cuyo borde es difuso en gran parte de su recorrido debido a la presencia de barro muy húmedo y la existencia de afloramientos rocosos. Dada la condición de canal se propuso un límite constante en la entrada, de modo que no se considere parte de la laguna.

Al este del canal de descarga, se observan dos entradas de agua, complejas en su configuración y que se unen entre sí hacia el Sur. Los bordes de ambas áreas son muy similares a lo que ocurre en gran parte la laguna, presentándose bordes definidos y difusos. En este sector no se observó flujo, sin embargo, se asignó un límite fijo considerando la configuración que posee hacia el sureste que sugiere la posibilidad que conforme un canal de descarga a partir de ciertas condiciones hidrológicas.

**FIGURA 5.5**  
**FOTOGRAFIAS DE PUNTOS DE CONTROL DE TERRENO**  
**LAGUNA PUILAR**



La laguna Puilar presentó en esta campaña una superficie de 70.003 m<sup>2</sup>, lo que implica un escaso aumento del 1,1% con respecto a la medición 2010. Si se comparan con las superficies de los monitoreos 2008 y 2009 se observa un aumento del 9,8%, y 6,5% respectivamente. Este aumento se produce por las diferencias metodológicas implementadas en el año 2010, referidas especialmente a la asignación de nuevos límites.



FIGURA 5.6  
LAGUNA PUILAR

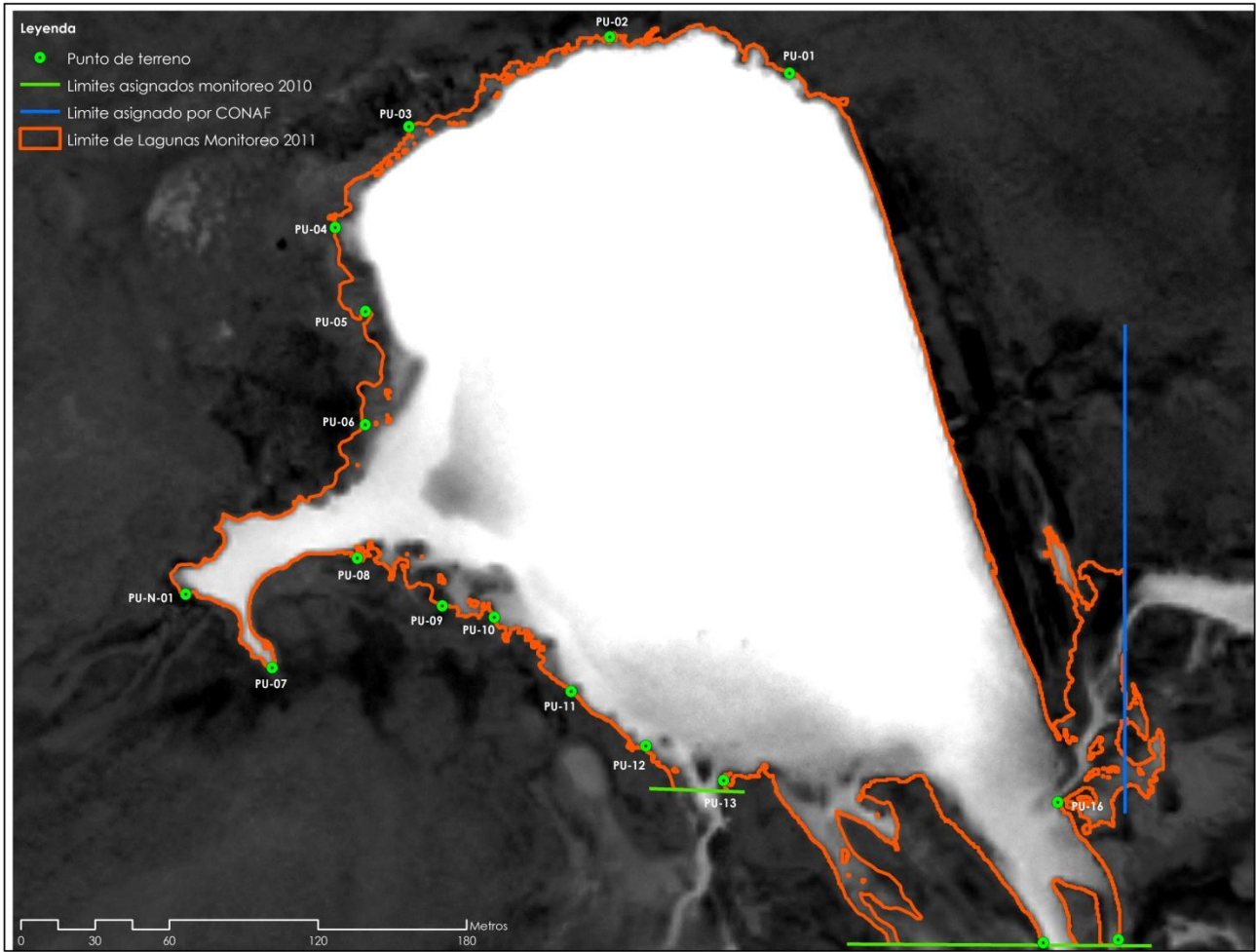


Imagen multiespectral

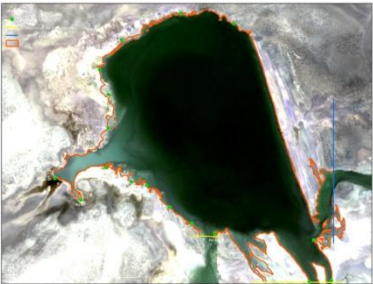


Imagen TSAVI

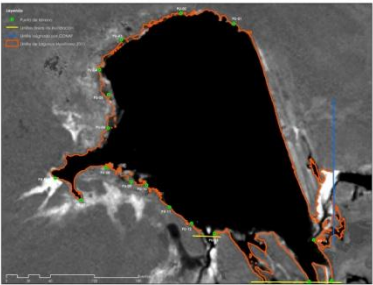
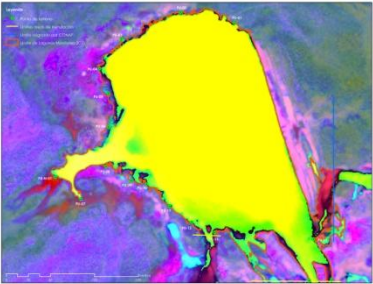


Imagen IHS



## 4.2 Sistema Peine

### 4.2.1 Laguna Salada

Laguna Salada está compuesta por un cuerpo principal y dos canales superficiales. El cuerpo principal posee contornos definidos en gran parte de su perímetro, constituido en su mayoría por una costra salina y en menor medida por una cubierta abundante en materia orgánica. En el sector Suroeste se observan afloramientos rocosos correspondiente a nidos de flamencos abandonados (Ver Figura 5.7 Punto SA-01).

El canal de recarga se ubica en el sector Este de la laguna, presentando contornos definidos excepto en el borde Sur, donde son difusos. (Ver figura 5.7, punto SA-04). El canal de descarga ubicado en la medianía de la laguna en el sector Oeste, presenta contornos definidos de forma muy similar al cuerpo de agua principal.

**FIGURA 5.7**  
**FOTOGRAFÍAS DE PUNTOS DE CONTROL DE TERRENO**  
**LAGUNA SALADA**



La laguna Salada presentó una superficie de 199.521 m<sup>2</sup>. Como se señala en la descripción, Salada se encuentra compuesta por tres sectores: el cuerpo principal, cuya superficie es de 170.524 m<sup>2</sup>, conformando el 85,5% de la laguna; el canal de recarga con 22.951 m<sup>2</sup>, representando el 11,5% de la laguna y finalmente, el canal de descarga con 6.046 m<sup>2</sup> conformando el 3,0% de la laguna.

Respecto a la medición realizada el 2010, la superficie de la laguna Salada en 2011 aumentó en 0,7%.

Si se comparan con las superficies de los monitoreos 2008 y 2009 se observa un aumento del 11,7% y 1,5% respectivamente. Este aumento se debe a las diferencias metodológicas señaladas en la sección 4.5, fundamentalmente en la utilización puntos de control de terreno.

FIGURA 5.8  
LAGUNA SALADA

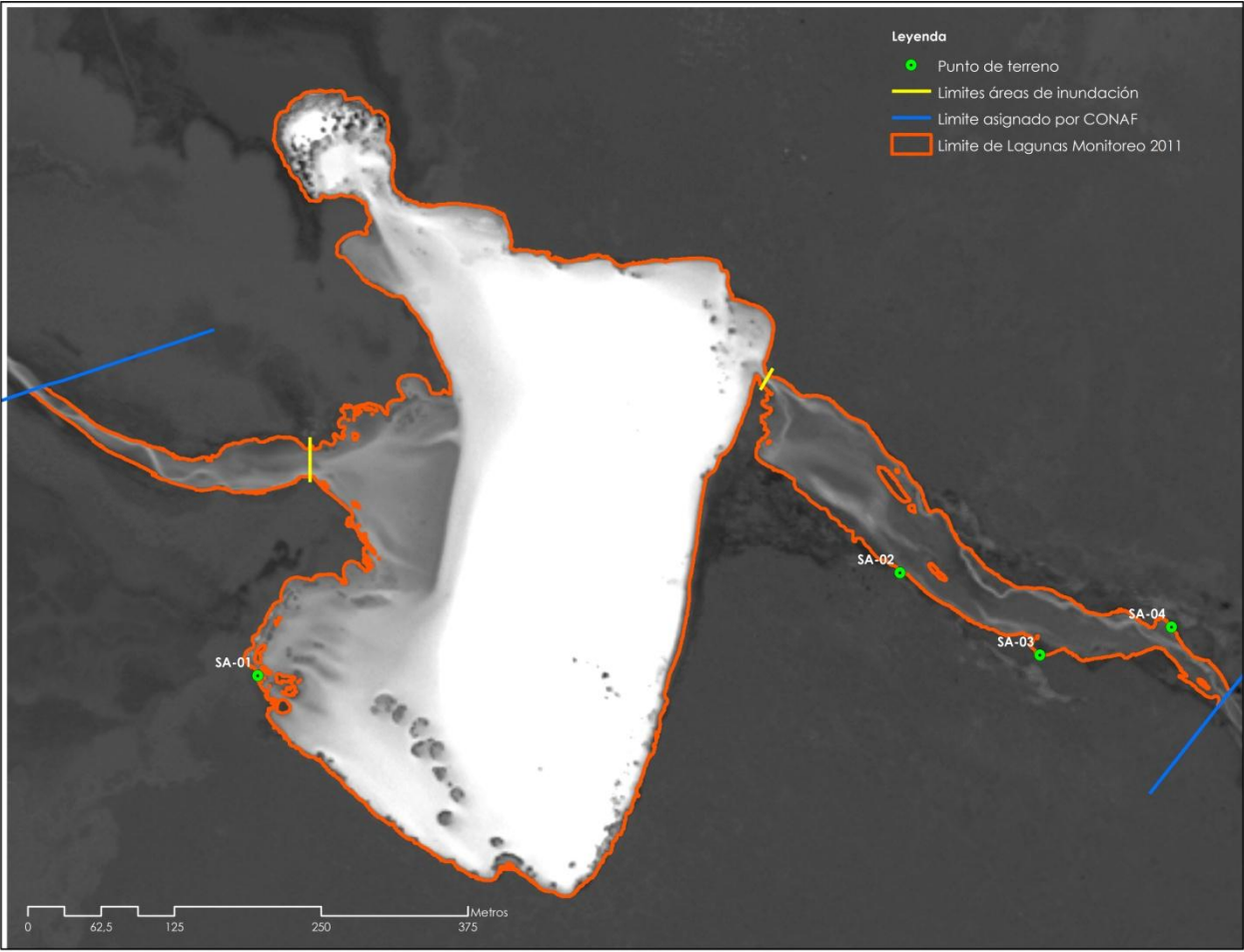


Imagen multiespectral



Imagen TSAVI

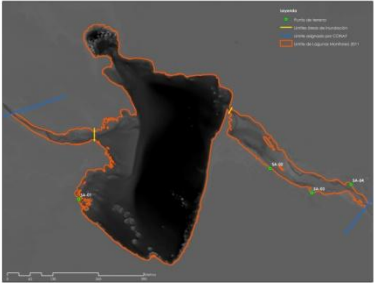
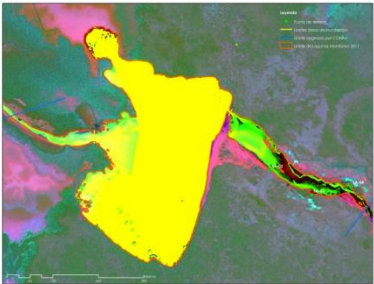


Imagen IHS

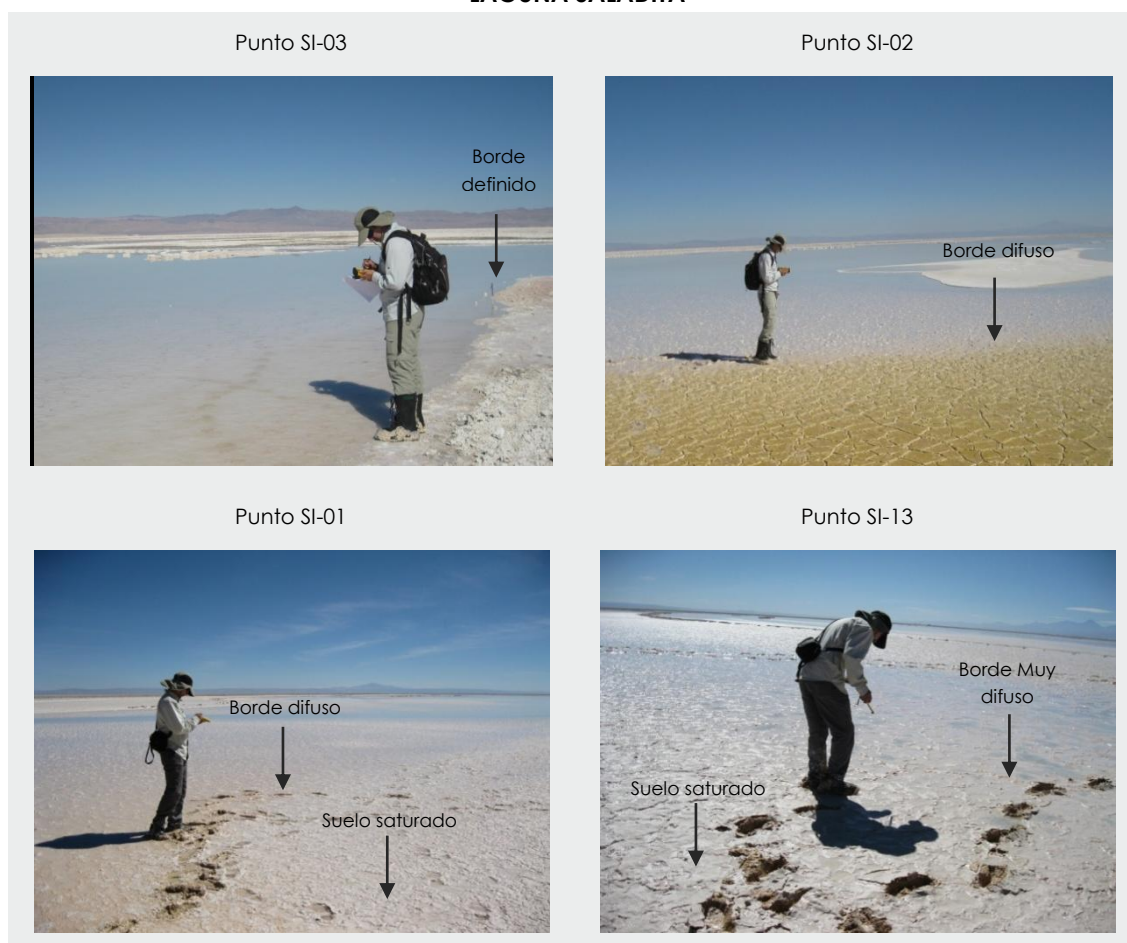


#### 4.2.2 Laguna Saladita

Laguna Saladita está compuesta de un cuerpo principal sin áreas de inundación evidentes. En líneas generales los bordes de laguna son muy difusos, a excepción de los segmentos ubicados al Este, Noreste y segmentos del sector Norte que presenta un borde bien definido producto de una costra salina (Ver figura 4.9, Punto SI-03). El resto de las secciones se encuentra constituidos por un barro húmedo (Ver figura 4.9, Punto SI-05) y/o muchas entradas de sedimento al interior de la laguna. En la mayoría de los casos estos afloramientos sedimentarios, correspondientes a nidos de flamencos utilizados en los periodos de nidificación.

Es notable la presencia de dos sectores muy difusos, uno ubicado en el sector Suroeste y otro en el sector Sureste (Ver figura 5.10). Ambos corresponden a sectores cubiertos por milímetros de agua, aledaños a un suelo muy saturado (Ver figura 5.9, Puntos SI-01 y SI-13). Lo anterior implicó una compleja delimitación de sus contornos tanto en terreno como en la imagen satelital.

**FIGURA 5.9**  
**FOTOGRAFÍAS DE PUNTOS DE CONTROL DE TERRENO**  
**LAGUNA SALADITA**





Laguna Salada en la campaña 2011 presentó una superficie de 110.394 m<sup>2</sup>, aumentando en 2,1% con respecto a la medición del año anterior (108.022 m<sup>2</sup>). Dichas diferencias se concentran en sectores difusos del Sector Este de la Laguna (Figura 5.10).

Si se compara la medición 2011 con las mediciones 2008 y 2009 se observa un aumento del 9,7% y 4,6% respectivamente. Este aumento se debe a las diferencias metodológicas señaladas en la sección 4.5, especialmente en la utilización de puntos de control de terreno.



FIGURA 5.10  
LAGUNA SALADITA

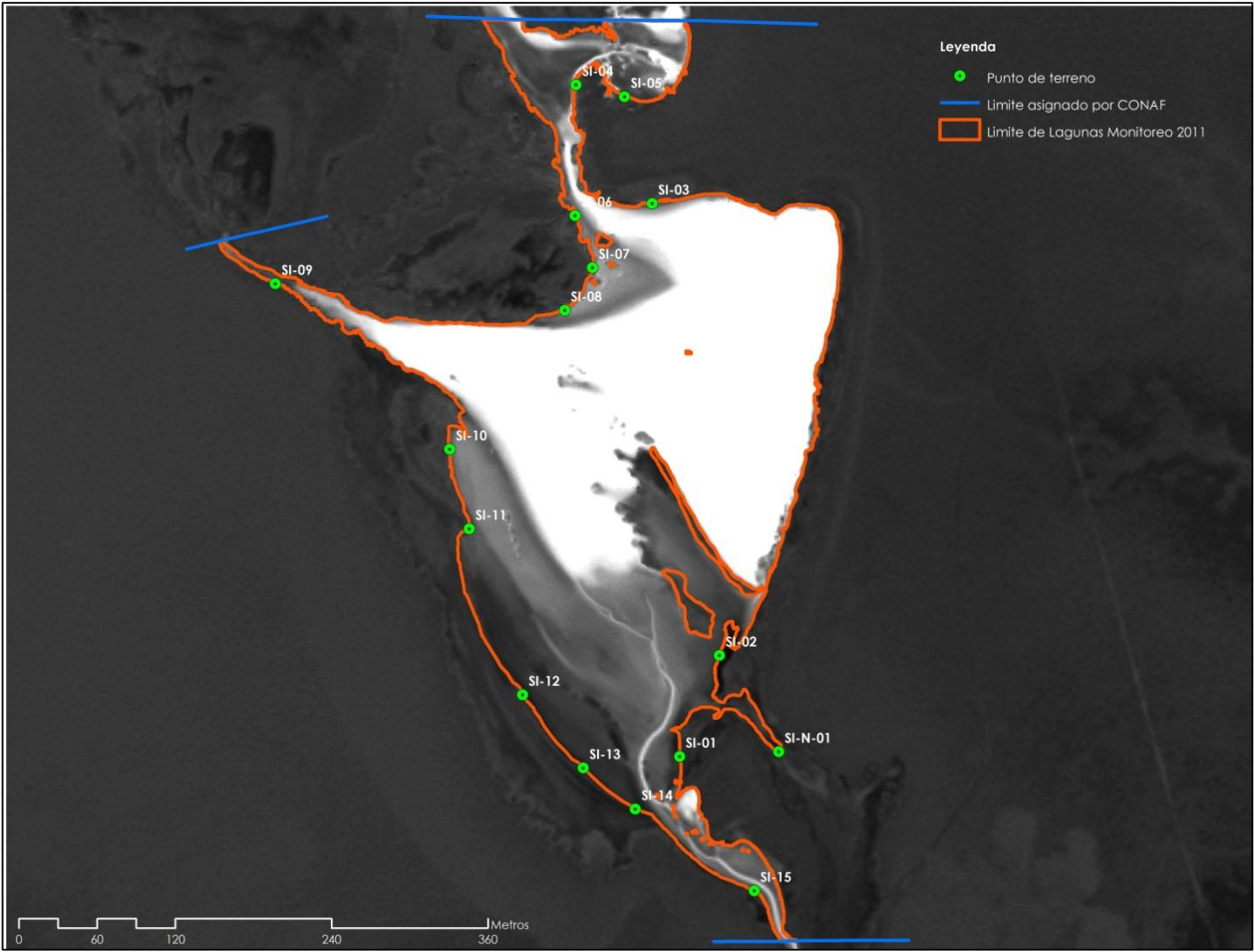


Imagen multiespectral

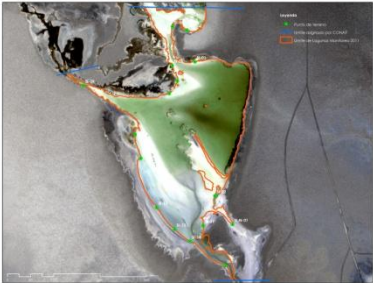


Imagen TSAVI

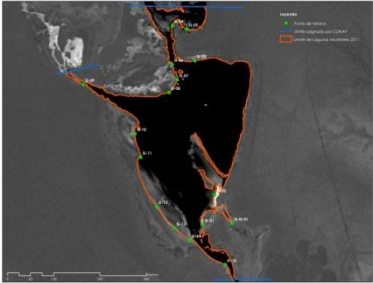
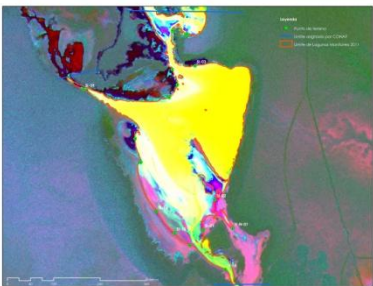


Imagen IHS



#### 4.2.3 Laguna Interna

Tal como se señala en la validación de superficies lacustres del 2009, Interna no conforma un cuerpo lacustre de superficie continua, como es el caso del resto de las lagunas analizadas. En efecto, no es posible distinguir un cuerpo de agua principal que se mantenga estable en el tiempo. Laguna Interna está constituida por un conjunto de cientos de cuerpos de agua someros y un gran cantidad de pequeñas áreas sin agua, señaladas como Islas de sedimento.

Para este monitoreo Interna presentó una superficie de 182.616 m<sup>2</sup>. En términos de comparación, se observa un descenso del 8,9% con respecto a la medición del año 2010. Mientras que la comparación con el año 2009, muestra la misma tendencia en un 9,5%.

FIGURA 5.11  
LAGUNA INTERNA

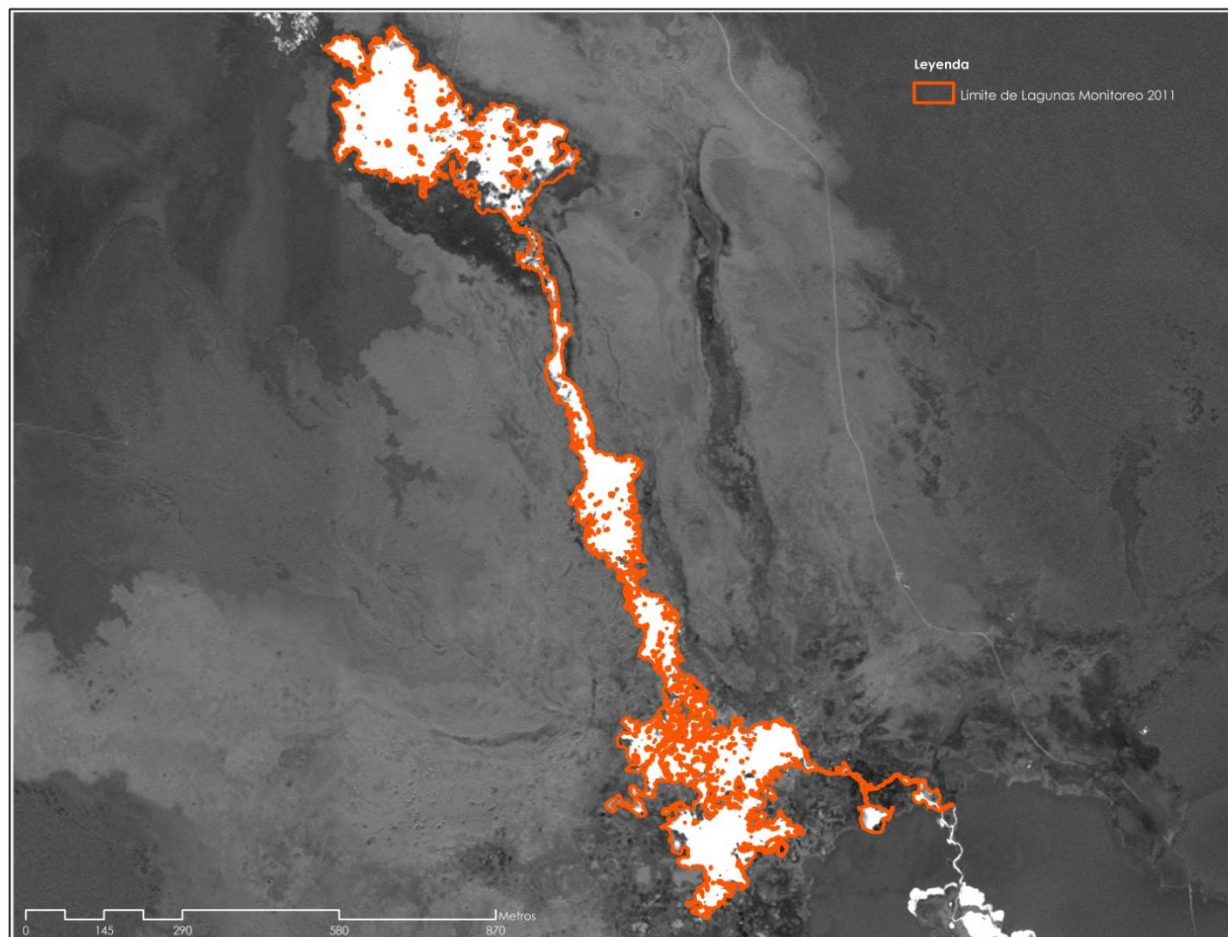


Imagen multiespectral



Imagen TSAVI

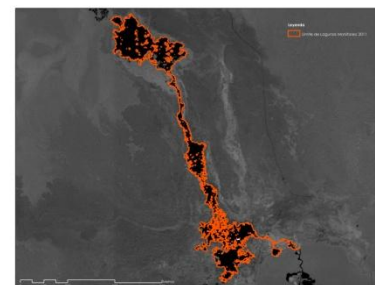
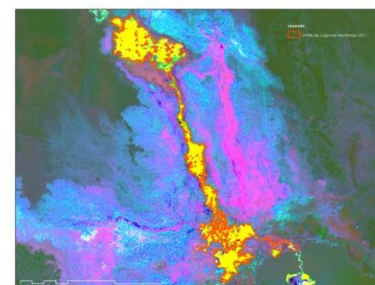


Imagen IHS



En la tabla 5.1 se exponen los resultados de las superficies de los cuerpos lacustres analizados, desde al año 2008 hasta el 2011.

**TABLA 5.1**  
**SUPERFICIES DE CUERPOS LACUSTRES MEDIDAS EN ABRIL DE 2008, 2009, 2010 Y 2011**  
**MEDIANTE ANÁLISIS DE IMAGEN SATELITAL**

SISTEMA LACUSTRE	LAGUNA	SUPERFICIE (m <sup>2</sup> )			
		2008 <sup>3</sup>	2009 <sup>3</sup>	2010	2011
SONCOR	<b>CHAXA</b>				
	Cuerpo principal	329.224	336.644	308.357	305.433
	<b>Total Chaxa</b>	<b>329.224</b>	<b>336.644</b>	<b>308.357</b>	<b>305.433</b>
	<b>BARROS NEGROS</b>				
	Cuerpo principal	1.093.625 <sup>4</sup>	1.152.803 <sup>4</sup>	1.048.924	1.083.311
	Área de inundación I (Cola de pez)	-	-	104.729	152.349
	Área de inundación II	-	-	40.084	53.035
	Área de inundación III	-	-	9.924	36.753
	<b>Total Barros Negros</b>	<b>1.093.625</b>	<b>1.152.803</b>	<b>1.203.662</b>	<b>1.325.448</b>
	<b>PUILAR</b>				
PEINE	Cuerpo principal	63.154	65.439	69.267	70.003
	<b>Total Puilar</b>	<b>63.154</b>	<b>65.439</b>	<b>69.267</b>	<b>70.003</b>
	<b>SALADA</b>				
	Cuerpo principal	176.126	196.616	169.635	170.524
	Canal de recarga	-	-	22.662	22.951
	Canal de descarga	-	-	5.881	6.046
	<b>Total Salada</b>	<b>176.126</b>	<b>196.616</b>	<b>198.178</b>	<b>199.521</b>
	<b>SALADITA</b>				
	Cuerpo principal	99.665	105.274	108.022	110.394
	<b>Total Saladita</b>	<b>99.665</b>	<b>105.274</b>	<b>108.022</b>	<b>110.394</b>
	<b>INTERNA</b>				
	Cuerpo principal	-	199.968	198.838	182.616
	<b>Total Interna</b>	<b>-</b>	<b>199.968</b>	<b>198.838</b>	<b>182.616</b>

<sup>3</sup> Medición realizada según método señalado en RCA 226/2006

<sup>4</sup> El monitoreo de estos años no consideró el área de inundación I (Cola de pez) por cuanto esta correspondía a un límite CONAF. La superficie presentadas en el cuerpo principal incluye las áreas de inundación II y III, desglosadas en los monitoreos posteriores.

## 5 CONCLUSIONES

- Se confirma que el uso de imágenes satelitales de alta resolución fusionadas, el apoyo de índices alternativos (IHS, TSAVI, NDWI) y especialmente los puntos de control en terreno, representan una herramienta adecuada y necesaria para la definición de límites en los bordes difusos e irregulares de las superficies de las lagunas analizadas.
- El complemento, en algunos cuerpos lacustres, de los puntos de control de terreno comprometidos en la Resolución Exenta N° 244/2010, fue necesario para la adecuada definición de sus bordes. En efecto se agregaron siete puntos de control en la laguna Barros negros, uno en laguna Puilar y uno en laguna Saladita.
- Se identificó 3 áreas de inundación, definidas como sectores de lagunas que debido a su dinámica histórica presentan variaciones sostenidas y significativas en su contorno, ubicadas en su totalidad en laguna Barros negros. Una de éstas, conocida como "Cola de Pez", no fue considerada en los cálculos de la superficie de la laguna los años 2008 y 2009, marcando así diferencias con los resultados de las mediciones posteriores.
- Se observó que Chaxa, Puilar, Salada y Saladita presentan bajas diferencias en su superficie respecto al año 2010 (<3%).
- La superficie de la laguna Barros Negros aumentó en un 9,2%. Esto se explica, en parte, por la identificación y el crecimiento de las tres áreas de inundación y la aparición de pequeños apéndices.
- Por otro lado, laguna Interna disminuyó su superficie en un 8,9%. En esta laguna existen sectores donde la clasificación y el resultado de las transformaciones de las imágenes multiespectrales no es determinante, dada la muy baja profundidad del agua.
- Las diferencias observadas en los resultados de los distintos años del monitoreo (2008 a 2011), no reflejan necesariamente una tendencia de la dinámica de la superficie lacustre en este periodo de tiempo, sino más bien obedecen a limitaciones y diferencias metodológicas que se han producido, especialmente a partir del año 2010, con el propósito de mejorar el método de medición.

## 6 REFERENCIAS

Chuvieco, E., 2002. Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Ediciones Ariel. 578p.

McFeeters S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing. 17(7):1425-1432.

Siddiqui, Y. 2003. The modified IHS method for fusing satellite imagery. ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings, May 5-9, 2003